

УДК 621.791.927.5

doi:10.20998/2413-4295.2018.45.03

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЧЕСКИХ УПРАВЛЯЕМЫХ КОЛЕБАНИЙ В СИСТЕМАХ ПОДАЧИ ЭЛЕКТРОДНОЙ ПРОВОЛОКИ МЕХАНИЗИРОВАННОГО И АВТОМАТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СВАРКИ И НАПЛАВКИ

В. А. ЛЕБЕДЕВ*, Г. В. ЖУК

ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, г. Киев, УКРАИНА

*e-mail: valpaton@ukr.net

АННОТАЦИЯ В статье отмечена важность решения задачи при сварке – наплавке механизированным или автоматическим оборудованием, связанной с эксплуатационными свойствами сварного шва или наплавленного слоя, в частности прочностными характеристиками, характеристиками износостойчивости и др. Проведен анализ существующих способов и методик, влияющих на структуру металла шва или наплавленного валика при электродуговой сварке – наплавке с использованием электродной проволоки. Особо отмечаются технико-технологические решения, связанные с работой основных систем сварочного и наплавочного оборудования в управляемом режиме с импульсными алгоритмами функционирования. Рассмотрен способ управления структуризацией наплавленного металла, наплавленного механизированными способами с использованием импульсной подачи электродной проволоки с регулируемыми параметрами её движения (частота, амплитуда, скважность). Разработана и предложена для практического применения в технологической практике и конструкторской практике методика определения параметров колебаний, основанная на периодическом изменении тепловложений в металл ванны с общим снижением общей их величины. Основная посылка для решения задачи снижения тепловложений состоит в уменьшении разницы между температурами плавления и перегрева. Уменьшение разницы между температурами плавления и перегрева за счёт импульсного движения электродной проволоки с выбранными параметрами по разработанной методике ведёт к ограничению роста кристаллитов и их дезориентации. Важным следствием применения импульсных воздействий в системе подачи является дегазация сварочной ванны, а также снижение уровня неметаллических включений.

Адекватность методики расчёта параметров колебаний подтверждена полученными при наплавке результатами для сравнения с импульсной и обычной подачей электродной проволоки. Вывод сделан на основании изучения структур шва или наплавленного металла на микрошлифах с выявлением размеров и ориентации кристаллитов. Исследование влияния параметров импульсной подачи с алгоритмом функционирования, соответствующим рассмотренной методике, позволяющей реализовать предложенный способ наплавки, выполнялось с применением нового устройства импульсной подачи, конструкция которого включает регулируемый компьютеризованный вентильный электропривод специальной разработки, выполненной в Украине с безредукторным механизмом подачи. Сам способ сварки и наплавки в итоге повышает прочность сварного соединения, износостойкость наплавленного слоя металла, тем самым увеличивает ресурс работы металлоконструкций и рабочих органов разных машин и механизмов. Немаловажным является снижение деформаций, в частности при сварке тонколистовых изделий без дополнительных приспособлений.

Ключевые слова: механизированная дуговая сварка; наплавка; структуризация металла; механические колебания; параметры; выбор; управление.

ANALYSIS OF PARAMETERS OF TECHNICAL CONTROLLED VIBRATIONS IN ELECTRODE WIRE SYSTEMS MECHANIZED AND AUTOMATIC EQUIPMENT FOR ELECTRIC ARC WELDING AND SURFACING

V. LEBEDEV, G. ZHUK

E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine", Kiev, UKRAINE

ABSTRACT The article noted the importance of solving the problem in welding – surfacing with mechanized or automatic equipment associated with the performance properties of the weld or weld layer, in particular, strength characteristics, wear resistance characteristics, etc. The analysis of existing methods and techniques that affect the structure of the metal of the weld or weld bead during arc welding with the use of electrode wire is carried out. Technical and technological solutions related to the operation of the main systems of welding and surfacing equipment in a controlled mode with pulsed operation algorithms are especially noted. The paper discusses the method of controlling the structurization of the deposited metal, deposited by mechanized methods using pulsed feeding of electrode wire with adjustable parameters of its movement (frequency, amplitude, duty cycle). A technique for determining vibration parameters, based on a periodic change in the heat input into the metal of the bath with a general decrease in their total value, was developed and proposed for practical application in technological practice and design practice. The main premise for solving the problem of reducing heat input is to reduce the difference between melting points and overheating. Reducing the difference between the melting and overheating temperatures due to the pulse movement of the electrode wire with the selected parameters by the parameters developed by the method leads to the restriction of crystallite growth and their disorientation. An important consequence of the use of pulse effects in the supply system is the degassing of the weld pool, as well as the reduction in the level of non-metallic inclusions.

The adequacy of the method of calculating the parameters of oscillations is confirmed by the results obtained during surfacing for comparison with the pulsed and conventional feed of the electrode wire. The conclusion is made on the basis of studying the structures of the weld or weld metal on microsections with the identification of the sizes and orientation of crystallites. The study of the influence of the parameters of the pulse feed, with the functioning algorithm of the corresponding considered methods, allows to implement the proposed method of surfacing using a new pulse feed device, the design of which includes an adjustable computerized valve actuator of special development, made in Ukraine with a gearless gear. The method of welding and surfacing ultimately increases the strength of the welded joint, the wear resistance of the deposited metal layer, thereby increasing the service life of metal structures and working bodies of various machines and mechanisms. It is also important to reduce deformations, in particular when welding thin-sheet products without additional devices.

Keywords: mechanized arc welding; surfacing; metal structuring; mechanical vibrations; parameters; selection; control.

Введение

Большой объём оборудования для реализации механизированных и автоматических процессов сварки и наплавки сплошными и порошковыми электродными проволоками предполагает его постоянное совершенствование так же, как и совершенствование технологий и материалов (электродных проволок, защитных сред, в том числе защитных газов). Все направления совершенствования направлены на получение качественного сварного соединения, наплавленного слоя, расширение сфер применения механизированного и автоматического сварочного оборудования и улучшение условий работы персонала, а также достижение результата с минимальными энерго и ресурсозатратами.

Существуют ряд способов достижения результата повышения эффективности сварочного оборудования, которые можно укрупненно разделить на следующие основные группы подробно проанализированные в работе [1]:

1. применение новых сварочных материалов, защитных средств, активирующих веществ, в частности паст, порошкообразных материалов с функцией периодического охлаждения сварочной ванны;
2. использование возможностей современных источников сварочного тока инверторного типа с организацией импульсных режимов с различными алгоритмами, в том числе реализация импульсного дугового процесса;
3. применение магнитных полей разного назначения, в том числе для колебаний дуги и управления процессом переноса электродного металла.
4. модуляция параметров сварочного процесса;
5. колебания сварочной ванны (управляемый вибрационный процесс);
6. импульсная подача защитных газов;
7. импульсная подача электродной проволоки с различными алгоритмами формирования параметров импульсного движения.

Все вышеуказанные группы повышения эффективности работы оборудования для механизированных и автоматических процессов сварки и наплавки могут быть целенаправленно применены для решения задач, связанных с улучшением структурой металла шва и зоны

термического влияния, как одной из основных задач получения качественного сварного соединения и наплавленного слоя с высокими показателями механических свойств.

Можно отметить, что в процессе дуговой сварки – наплавки кристаллическая структура металла, которая подверглась термическому воздействию дуги, в той или иной степени отлична от структуры основного металла. Это относится к химическому составу материала (сохранность легирующих элементов, размеров зёрен, направлению роста кристаллов). Эти проявления существенным образом влияют на свойства металла шва, околошовной зоны, наплавленного слоя, снижая эксплуатационные свойства соединения, восстановленной детали [2].

Известно [3], что механические воздействия на жидкий металл сварочной ванны в значительной мере влияют на кристаллическую структуру. Проблема заключается в том, что в технической литературе весьма ограничена, а зачастую противоречива информация о параметрах механических импульсных воздействий, оказывающих эффективное влияние на улучшение металла в зоне действия дуги.

К числу импульсных воздействий со стороны системы плачи электродной проволоки для механизированного оборудования относятся механизмы подачи, в автоматическом оборудовании механизмы подачи могут быть дополнены устройствами колебаний проволоки относительно направления ведения процесса.

Цель работы

Целью настоящей работы является анализ методики основных параметров механических модулированных и импульсных воздействий, генерируемых в системе подачи электродной проволоки, влияющих на структуру сварного шва и слоя наплавленных валиков с качественными аналитическими выводами.

Изложение основного материала

Следует отметить, что в соответствии с выводами работы [4] во многом прочностные характеристики металла шва определяет наличие столбчатых кристаллов, рост которых обуславливается перегревом расплавленной ванны,

низкой скоростью сварки и хорошим теплоотводом изделия со значительной массой. Очевидно, что для решения задачи управления ростом столбчатых кристаллов необходима организация цикла сварки с влиянием на указанные выше характеристики. Со скоростью сварки всё ясно, если имеется техническая возможность и технологическая обусловленность, то скорости ведения процесса необходимо повышать.

Рассмотрим другие возможности ограничения роста столбчатых кристаллов металла в наплавленном металле.

Среди них отметим введение в ванну специальных порошков, снижающих температуру перегрева жидкого металла [5], а также периодическое изменение режима сварки (модуляция [6]) и относительное перемещение источника нагрева – дуги (колебания [7]), позволяющее рассредоточить место нагрева. Последнее достаточно хорошо изучено, как способ сварки-наплавки с внеосевыми колебаниями электродной проволоки. Однако имеющиеся в литературе сведения, насколько нам известно, не дают однозначных рекомендаций по выбору для технологического процесса амплитуд и частот колебаний, которые были бы эффективны для ограничения скорости роста кристаллитов в наплавленном металле. Обычно этот выбор связан с экспериментальными работами.

В работе [8] отмечено, что наиболее действенными способами измельчения структуры наплавленного металла является управление степенью концентрационного переохлаждения, а также воздействие сопутствующих и специально введённых колебаний на ванну жидкого металла.

Исходя из вышеуказанного, а также данных указанной работы [4], и работы [9] известно, что условием подавления роста столбчатых кристаллов является снижение перегрева сварочной ванны, т.е. снижение теплосодержания ванны жидкого металла. Исходя из этого, можно записать выражения для теплосодержания ванны:

при температуре плавления

$$S_{нл} = \frac{Q_{нл}}{P_{нл}}, \quad (1)$$

где $S_{нл}$ – теплосодержание ванны при температуре плавления; $Q_{нл}$ – тепло ванны при температуре плавления; $P_{нл}$ – вес расплавленного металла;

при температуре перегрева

$$S_n = \frac{Q_n}{P_n} \quad (2)$$

где S_n – теплосодержание ванны при температуре плавления; Q_n – тепло ванны при

температуре плавления; P_n – вес расплавленного металла.

Очевидно, что для подавления роста столбчатых кристаллов необходимо выполнение условия

$$S_n \rightarrow S_{нл} \quad (3)$$

или

$$\frac{Q_n}{P_n} \rightarrow \frac{Q_{нл}}{P_{нл}} \quad (4)$$

Заметим, что в выражениях (1) (2) принято, что вес металла жидкой ванны при температуре плавления и перегрева отличается незначительно, поэтому можно принять

$$P_n \approx P_{нл} \quad (5)$$

Принимая во внимание (5), выражение (4) можно переписать следующим образом

$$\frac{Q_n}{P_n} \rightarrow \frac{Q_{нл}}{P_p} \quad (6)$$

Для выполнения условия (3) подавления роста столбчатых кристаллов (3) необходимо снизить теплосодержание ванны жидкого металла при температуре перегрева.

Это возможно, в том числе, при периодическом отводе источника нагрева – дуги от точки перегрева. Это, как уже отмечалось, возможно, при выполнении относительных колебательных движениях дуги.

Выражение (6) при условии (5) принимает вид

$$Q_n \rightarrow Q_{нл} \quad (7)$$

При колебаниях дуги периодически изменяется температурное поле нагреваемого объекта. Известно [10], что тепловое поле движущейся сварочной дуги при наплавке на массивное тело может быть описано выражением

$$T(h) = \frac{q_u}{2\pi\lambda h} e^{-\frac{v_n h}{a}}, \quad (8)$$

где T – температура ванны; h – координаты точки, где определяется температура; q_u – эффективный удельный тепловой поток; λ – коэффициент теплопроводности; a – коэффициент температуропроводности; v_n – скорость перемещения источника нагрева.

Для упрощения дальнейших выводов преобразуем выражение (8), используя разложение в степенные ряды (ряд Фурье), взяв при этом первые

три члена разложения и полагая при этом, что для первоначальных исследований этой точности будет достаточно. При этом получим

$$T(h) = \frac{q_u}{2\pi\lambda h} \left(1 - \frac{vh}{a} + \frac{\left(\frac{vh}{a}\right)^2}{2}\right) \quad (9)$$

Учтём энергетические параметры дуги в определении q_u

$$q_u = 0,24UI\eta \quad (10)$$

где U, I – напряжение и ток дуги; η – эффективный коэффициент процесса нагрева изделия дугой.

Учитывая (10) получим выражение (9) в виде

$$T(h) = \frac{0,24UI\eta_u}{2\pi\lambda h} \left(1 - \frac{vh}{a} + \frac{\left(\frac{vh}{a}\right)^2}{2}\right) \quad (11)$$

Можно положить, что затраты энергии, выражающиеся в количестве теплоты идущей на плавление металла ванны $Q_{э,пл}$ и перегрев ванны $Q_{э,н}$, в случае решения задачи ограничения роста столбчатых кристаллов также будут находиться в соотношении

$$Q_{э,н} \rightarrow Q_{э,пл} \quad (12)$$

Если сварка - наплавка производится на одном режиме (ток I_d и U_d и напряжение дуги неизменны), следовательно, различные другие параметры процесса должны обеспечивать как расплавление, так и перегрев металла.

Расплавлению и перегреву основного металла будут соответствовать разные температуры, что

Таблица 1 – Тепловые характеристики сталей

Материал	$T_{\text{в}}, ^\circ\text{C}$		$T_{\text{пл}}, ^\circ\text{C}$	Примечание
	Данные [11]	Данные авторов (усреднённые)		
Сталь 3	1800	1780	1530	
Инструментальная сталь X12Ф1	1550	1610	1320	

Исходя из выражений (14), (15) с учётом того, что согласно температура ванны не зависит от режима сварки – наплавки и, проведя некоторые преобразования, найдём значение разницы

можно отразить в уравнениях в соответствие с (11) и учётом того, что

$$Q_{э,пл} = UI t, \text{ а } q_u = \frac{Q}{m}, \quad (13)$$

где m – масса расплавленного металла ванны: при определении температуры расплавления

$T_{пл}$ можно принять уравнение (11) в виде

$$T_{пл}(h) = \frac{0,24UI\eta_u}{2\pi\lambda h} \left(1 - \frac{vh}{a} + \frac{\left(\frac{vh}{a}\right)^2}{2}\right) \quad (14)$$

При интенсивном перегреве, т.е. практически в точке концентрации тепла (непосредственно под дугой) можно принять

$$T_n(h) = \frac{0,24UI\eta_u}{2\pi\lambda h} \quad (15)$$

Далее будем рассуждать следующим образом. Решая задачу снижение температуры перегрева, необходимо (как возможный способ) обеспечить условие

$$T_n \rightarrow T_{пл} \quad (16)$$

Превышение температуры перегрева жидкой ванны над температурой плавления ΔT определяется

$$\Delta T = T_n - T_{пл} \quad (17)$$

Отметим, что из справочных материалов и экспериментальных исследований авторов с использованием пирометрических систем при наплавке металла электродной проволокой типа Св08Г2с в защитных газах с измерением средней температуры ванны $T_{\text{с}}$ определено, что $T_{\text{с}}, T_{пл}$ (справные данные) может составлять величины, представленные в табл. 1.

температур перегрева и плавления, которые нужно компенсировать для подавления (снижения) роста столбчатых кристаллов

$$\Delta T(h) = \frac{0,24P\eta}{2\pi\lambda} \frac{v_n}{a} \left(1 - \frac{v_n h}{2a}\right), \quad (18)$$

где $P = UI$ - мощность дуги

Выражение (18) является основой для выбора условий и средств для элементов управления подавлением роста столбчатых кристаллов в металле сварного шва и наплавленного валика. Очевидно, что задаваясь определённой производительностью сварки и наплавки весьма сложно, используя обычные дуговые процессы изменить величины U, I, η, v_n .

Учитывая, что весьма сложно определить зависимости между процессом сварки и размерами столбчатых кристаллов, а также влияние других факторов не учтённых в выражении (18), мы будем определять частично лишь тенденции влияния указанных выше параметров на искомый результат.

Прежде всего, по нашему мнению, и уже имеющимся результатам исследований, следует отметить, что импульсные технологии различной технической реализации могут быть использованы, в том числе и для решения задачи улучшения структуры металла в процес се сварки и наплавки.

В настоящей работе будем анализировать влияние управляемой импульсной подачи с определёнными параметрами на подавление роста столбчатых кристаллов, а, следовательно улучшение структуры металла с повышением эксплуатационных свойств сварного соединения и наплавленных узлов и деталей.

Влияние U, I напряжения и тока сварки, изменяющихся в соответствии с алгоритмами управляемой импульсной подачи электродной проволоки на возможность подавлении роста кристаллов (минимизация значения $\Delta T(h)$)

В работе [12] выведено и проанализировано уравнение, описывающее мощность (энергозатраты) $P_{u.cp}$ на плавление электродной проволоки при импульсной подаче с частотой f и имеющее следующий вид

$$P_{u.cp} = \beta n \left\{ k_{\phi} T - \frac{f}{b\delta^2} \{ e^{-aT} [(a \sin(bT - \mu) - b \cos(bT - \mu)] + a \sin(\mu) - b \cos(\mu)) \} \right\}, \quad (19)$$

где β, n -коэффициенты, характеризующие электродную проволоку (тип, диаметр), параметры сварочной цепи и дугового процесса (ток I , напряжение U); T_w - время цикла переноса электродного металла; b - частота затухающих колебаний в сварочной цепи при плавлении электродной проволоки; μ - сдвиг фаз

колебательных процессов; a - величина, определяемая постоянной времени сварочной цепи; δ - коэффициент определяющий параметры (постоянные времени) сварочной цепи; k_{ϕ} - коэффициент, учитывающий форму и скважность импульсов подачи

Следует ещё раз подчеркнуть, что в реальном дуговом процессе с импульсной подачей электродной проволоки участвует достаточно большое число факторов, которые, по мере их изучения, учтены в вышеприведенном уравнении (19), включая и характеристики сварочной цепи, которые ранее практически не изучались, т.е. реально источник сварочного тока работает на нагрузку отличную от активной. В связи с указанным весьма сложно точно рассчитать мощность процесса при импульсной подаче с учётом и возможным выбором всех параметров, оказывающих влияние на импульсный процесс.

Обозначив колебательную часть уравнения (19) как

$$K = a \sin(bT - \mu) - b \cos(bT - \mu) + a \sin(\mu) - b \cos(\mu)$$

перепишем уравнение (19) в виде

$$P_{u.cp} = \beta n (k_{\phi} T - K \frac{f}{b\delta^2} e^{-aT}) \quad (20)$$

Следует уточнить, что энергозатраты $P_{u.cp}$ на процесс сварки с импульсной подачей электродной проволоки, выраженные в уравнениях (19), (20) носит интегральный (усреднённый) характер. Адекватность полученных выражений проверялась с использованием специально разработанного прибора, описанного в работе [13]. Сходимость вычисленных и измеренных результатов для ряда характеристик импульсов подачи и средних значениях токов сварки в диапазоне 150...200 А находится на уровне 18...23%.

Влияние η_u - эффективного коэффициента процесса нагрева изделия дугой при сварке - наплавке с импульсной подачей электродной проволоки на возможность подавлении роста кристаллов (минимизация значения $\Delta T(h)$)

Очевидно, что уровень коэффициента нагрева изделия дугой существенно влияет на процесс сварки и колеблется в значительных пределах для разных способов сварки и условий её проведения. Это, в частности, относится и процессу дуговой механизированной сварки с разными способами подачи электродной проволоки

Рассматривая кинетику процесса дуговой сварки с импульсной подачей электродной проволоки можно заключить, что он проходит в некотором шаговом режиме, когда при сварочном её

перемещении с постоянной скоростью периодически проходит расплавление проволоки и основного металла. Исходя из этого имеются очевидные ограничения по скорости сварки обусловленные энергией тепла $Q_{э.пл}$ за время действия импульса t_u , так как каждый последующий импульс должен по проплавлению основного металла перекрывать предыдущий. Следует учесть, что при дуговой механизированной сварке выполняется соотношение

$$v_u \sim I_u,$$

где v_u и I_u - скорость и ток в импульсе подачи электродной проволоки соответственно.

Вводимое в ванну в течение импульса дуги тепло $Q_{э.пл.и}$ можно оценить следующим соотношением

$$Q_{э.пл.и} = q_u t_u = 0,24 U_{ul} I_{ul} \eta_{ul} t_u = 0,24 P_{ul} \eta_{ul} t_u, \quad (21)$$

где $U_{ul}, I_{ul}, P_{ul}, t_u$ - напряжение, ток, мощность и время горения дуги в импульсе подачи электродной проволоки.

Затраты энергии в импульсе определяются из (21)

$$P_u = \frac{q_u}{0,24 \eta_u} \quad (22)$$

Следует указать, что, исходя из имеющегося опыта работы с системами импульсной подачи напряжение сварки, в отличие от тока, остаётся таким же как и при обычной сварке

Воспользуемся выводами работы [14] и представим сварку с импульсной подачей электродной проволоки как импульсно-дуговой процесс, при этом, в первом приближении положим, что форма импульсов тока близка к прямоугольной, учитывая, что реальные импульсы не имеют формы, строго соответствующей названию.

При сварке с импульсной подачей электродной проволоки расчётное (среднее) значение тока сварки I_p составляет

$$I_p = \frac{I_u t_u}{1 + \frac{t_n}{t_u}}, \quad (23)$$

где I_u - ток в импульсе, t_u, t_n время действия импульса и паузы соответственно.

Расчётная (средняя мощность) дугового процесса с импульсной подачей электродной проволоки исходя из (22) определяется

$$P_u = \frac{q_u}{0,24 \eta_u} = U I_p \frac{\eta}{\eta_u} \quad (24)$$

Во время действия паузы или существенного снижения скорости подачи электродной проволоки охлаждается до полной или частичной кристаллизации ванны расплавленного металла, конечно с изменением формы размеров и положения кристаллов.

Учитывая (18), (23), (24) получим

$$\Delta T(h) = \frac{U I_p \eta}{2 \pi \lambda} \frac{v_n}{a} \left(1 - \frac{v_n h}{2a}\right) = \frac{U I_u \eta^2}{2 \pi \lambda \eta_u} \frac{v_n}{a} \left(1 - \frac{v_n}{2a}\right) \frac{t_u}{1 + \frac{t_p}{t_u}} \quad (25)$$

Следует отметить, что эффективные коэффициент процесса нагрева изделия дугой при сварке без импульсного воздействия со стороны подачи электродной проволоки η и с импульсными

алгоритмами η_u существенно отличаются друг от друга. Об этом свидетельствуют данные наших исследований, изложенных в работах [15], [16]. При этом практически всегда выполняется соотношение

$$\eta_u \geq \eta \quad (25)$$

Учитывая, что при прочих равных условиях и выполнении условий получения заданной производительности сварки - наплавки, а также учитывая средние значения мощностей дугового процесса с импульсной подачей электродной проволоки и без неё можно заключить, что одним из основных факторов уменьшения перепада температур $\Delta T(h)$ является соотношение

$$\frac{\eta^2}{\eta_u} < \eta \quad (26)$$

Параметры η_u, η зависят от всего многообразия характеристик дугового процесса и их значения можно определить экспериментальным путём.

Косвенным подтверждением вывода (26) являются эксперименты по наплавке валиков при одних и тех же условиях с условием получения процесса с одинаковым расходом электродной проволоки и выбором режимов с удовлетворительными результатами наплавки. Применялась электродная проволока Св08Г2С диаметром 1,2 мм. Процесс выполнялся в CO_2 с применением стандартных по размерам образцов. Измерение проводилось специальным устройством, упомянутом выше,

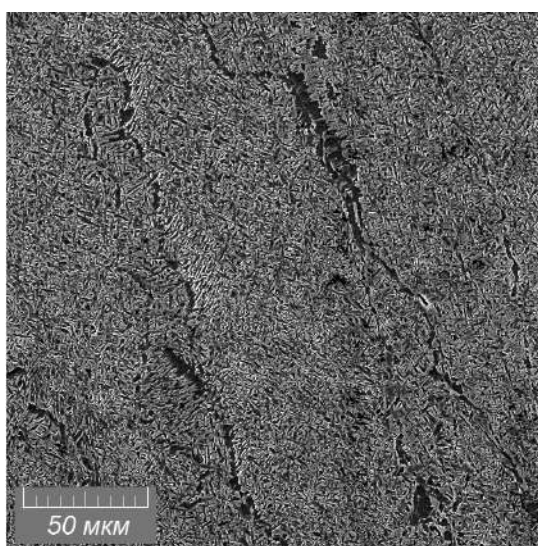
которое определяет затраченную на процесс величину энергии. Во избежание перегрева изделия все измерения проводились за фиксированное время – 5 с. Некоторые результаты экспериментов представлены в табл. 2. Затраты энергии в табл. 2 даны в виде Вт/м³, т.е. приведены к реальному объёму расплавленной электродной проволоки.

Изменение структуры металла шва при классической и импульсной подаче можно видеть на примерах микрошлифов на рис. 1.

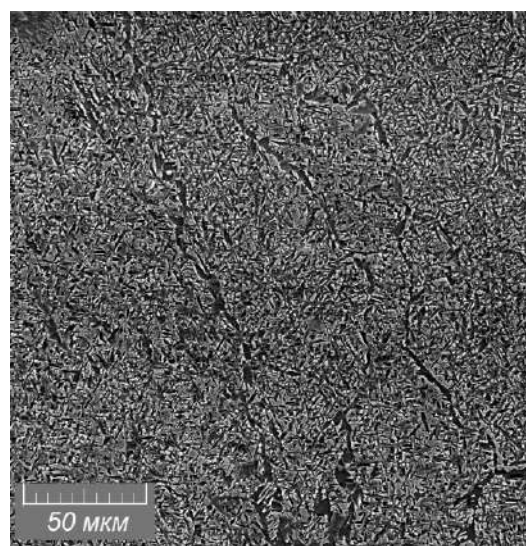
Величины и форма кристаллов при сварке – наплавке с упомянутыми способами подачи электродной проволоки можно видеть в табл. 3.

Таблица 2 – Затраты энергии на дуговой процесс

Способ подачи электродной проволоки	ЗАТРАТЫ ЭНЕРГИИ НА ДУГОВОЙ ПРОЦЕСС, Вт/м ³			
	Полярность обратная		Полярность прямая	
	Ток наплавки 130 А	Ток наплавки 200 А	Ток наплавки 130 А	Ток наплавки 200 А
Классическая	10,85	11	8,3	6,3
Импульсная	7,2	8,9	6,4	6,2



а)



б)

Рис. 1 – Микроструктура наплавленного в CO₂ металла 30ХГСА, данные электронной микроскопии ×1000 при способах подачи: а – классическая; б – импульсная

Таблица 3 – Количественные показатели формы кристаллитов в наплавленном металле в CO₂ 30ХГСА

КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ФОРМЫ КРИСТАЛЛИТОВ В НАПЛАВЛЕННОМ МЕТАЛЛЕ В CO ₂ 30ХГСА		
Способ подачи электродной проволоки	Ширина кристаллитов, мкм	Коэффициент формы кристаллитов
Классическая	97,5	6,8
Импульсная	70,0	4,56

Следует отметить, что результаты, представленные на рис.1 и табл.3, в части импульсной подачи выполнены при одних и тех же частотных характеристиках. Аналогичные результаты получены и для металла околосшовной зоны.

По нашему мнению изменения в структуре металла шва при импульсной подаче электродной проволоки (изменения в размерах кристаллов, их дезориентация) вызваны как изменением

характеристик теплового поля, так и механическими колебаниями ванны как результата действия электродинамических сил при импульсах тока как следствия импульсов подачи.

Выводы

1. Представленные в работе результаты аналитических расчётов влияния параметров

импульсной подачи на структуру металла сварного шва или наплавленного валика подтверждают возможность улучшения структуры металла шва и околошовной зоны.

2. Снижение разницы между температурами перегрева и плавления ΔT , способствующие ограничению роста кристаллов в ванне, обуславливаются рядом фактором, в том числе импульсной подачей электродной проволоки с изменением коэффициента нагрева изделия дугой.
3. Можно считать установленным, что снижение температур ΔT зависит от эффективных коэффициентов процесса нагрева изделия дугой при сварке, которые различны, в том числе и при разных способах и алгоритмах подачи электродной проволоки.

Список литературы

1. Патон, Б. Е. Механические импульсные и вибрационные воздействия в оборудовании и технологиях механизированной сварки и наплавки / Б. Е. Патон, В. А. Лебедев, Г. В. Жук, С. В. Драган // *"Вібрації в техніці та технології"*. 16-а Міжнародна науково-технічна конференція. Збірник тез доповідей. – Вінниця. – 26-27 жовтня 2017 р. – С. 10-16.
2. Островская, С. А. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / С. А. Островская, Г. И. Лесков, Г. З. Волошкевич и др. Под ред. Б.Е. Патона. - М.: Машиностроение. – 1974. – 768 с.
3. Болдырев, А. М. О механизме формирования структуры металла шва при введении низкочастотных колебаний в сварочную ванну / А. М. Болдырев // *Сварочное производство*. – 1976. – №2. – С. 1 – 3.
4. Ивочкин, И. И. Подавление роста столбчатых кристаллов методом "замораживания" сварочной ванны / И. И. Ивочкин // *Сварочное производство*. – 1965. – №12. – С. 52 – 55.
5. Зернин, Е. А. Способы модифицирования наплавленного металла наноструктурированными порошками для увеличения механических свойств сварных соединений / Е. А. Зернин, М. А. Кузнецов // *Современные проблемы науки и образования*. – 2014. – № 5.
6. Мирлин, Г. А. Дуговая сварка модулированным током / Г. А. Мирлин, В. И. Агеев, В. В. Барашев // *Сварочное производство*. - 1980. - № 8. - С. 16 - 17.
7. Макара, А. М. Поперечные перемещения дуги как фактор улучшения структуры и свойств сварных соединений / А. М. Макара, Б. Н. Кушнеренко // *Автоматическая сварка*. – 1967. – №1. – С. 31-35.
8. Ефимов, В. А. Физические методы воздействия на процессы затвердевания сплавов / В. А. Ефимов, А. С. Эльдарханов. – М., Металлургия, 1995. – 272 с.
9. Tewari, S. P. Influence of Longitudinal Oscillation on Tensile Properties of Medium Carbon steel Welds of Different Thickness / S. P. Tewari // *ISIJ International*. – 2009. – Vol. 14 (4). – P. 17-27.
10. Петров, Г. Л. Теория сварочных процессов / Г. Л. Петров, А. С. Тумарев. – М., Высшая школа, 1977. – 392 с.

11. Марочник сталей и сплавов. Под ред. А. С. Зубченко. – М.: Машиностроение. – 2003. – 784 с.
12. Лебедев, В. А. Энергосбережении при электродуговой механизированной и автоматической сварке с импульсной подачей электродной проволоки / В. А. Лебедев // *Автоматизация и современные технологии*. – 2014. – №1. – С. 34-38.
13. Лебедев, В. А. Устройство для оценки энергоэффективности процессов / В. А. Лебедев, М. В. Гулый, Г. А. Плехотко // *Сварка и диагностика*. – 2011. – №3. – С. 50-53.
14. Федько, В. Т. Сварка с импульсной подачей сварочной проволоки как частный случай импульсно-дуговой сварки / В. Т. Федько, О. Г. Брунов, П. Д. Соколов // *Сварочное производство*. – 2006. - №7. – С. 6 – 8.
15. Harris, I. Transfer of Heat and Mass to the Base Metal in Gas Metal Arc Welding / I. Harris // *Welding, Brazing, and Soldering*. – 2011. – Vol. 6. – P. 82-88.
16. Дюргеров, Н. Г. Определение свойств дуги при импульсных процессах сварки / Н. Г. Дюргеров, Д. Х. Сагиров // *Сварочное производство*. – 2004. – № 4. – С. 14-17.

References (transliterated)

1. Paton, B. E., Lebedev, V. A., Juk, G. V., Dragan, S. V. Mechanicheskie impulsnyie i vibratsionnyie vozdeystviya v oborudovanii i tehnologiyah mehanizirovannoy svarki i naplavki. "Vibratsii v tehnitsi ta tehnologiyah". 16-a Mijnarodna naukovu-tehnichna konferentsiya. Zbirnik tez dopovidey. Vinnitsya, 26-27 october 2017, 10-16.
2. Ostrovskaya, S. A., Leskov, G. I., Voloshkevich, G. Z. Et al. Tehnologiya elektricheskoy svarki metallov i splovov plavleniem. Pod red. B.E. Patona. M.: Mashinostroenie, 1974, 768.
3. Boldyrev, A. M. O mehanizme formirovaniya strukturyi metalla shva pri vvedenii nizkochastotnyih kolebaniy v svarochnyuyu vannu. Svarochnoe proizvodstvo, 1976, 2, 1-3.
4. Ivochkin, I. I. Podavlenie rosta stolbchatyih kristallov metodom "zamorajivaniya" svarochnoy vannyi. Svarochnoe proizvodstvo, 1965, 12, 52 – 55.
5. Zernin, E. A., Kuznetsov, M. A. Sposobyi modifitsirovaniya naplavlennogo metalla nanostrukturirovannyimi poroshkami dlya uvelicheniya mehanicheskikh svoystv svarnyih soedineniy. Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya, 2014, № 5.
6. Mirlin, G. A., Ageev, V. I., Barashev, V. V. Dugovaya svarka modulirovannyim tokom. Svarochnoe proizvodstvo, 1980, 8, 16 - 17.
7. Makara, A. M., Kushnerenko, B. N. Poperechnyye peremescheniya dugi kak faktor uluchsheniya strukturyi i svoystv svarnyih soedineniy. Avtomaticheskaya svarka, 1967, 1, 31-35.
8. Efimov, V. A., Eldarhanov, A. S. Fizicheskie metodyi vozdeystviya na protsessy zatverdevaniya splovov. M.: Metallurgiya, 1995, 272.
9. Tewari, S. P. Influence of Longitudinal Oscillation on Tensile Properties of Medium Carbon steel Welds of Different Thickness. ISIJ Internanational, 2009, 14 (4), 17-27.
10. Petrov, G. L., Tumarev, A. S. Teoriya svarochnyih protsessov. M.: Vysshaya shkola, 1977, 392.
11. Marochnik staley i splovov. Pod red. A. S. Zubchenko. M.: Mashinostroenie, 2003, 784.
12. Lebedev, V. A. Energoberezenii pri elektrodugovoy mehanizirovannoy i avtomaticheskoy svarkke s impulsnoy

- podachey elektrodnoy provoloki. *Avtomatizatsiya i sovremennyye tehnologii*, 2014, 1, 34-38.
13. **Lebedev, V. A., Gulyiy, M. V., Plehotko, G. A.** Ustroystvo dlya otsenki energoeffektivnosti protsessov. *Svarka i diagnostika*, 2011, 3, 50-53.
14. **Fedko, V. T., Brunov, O. G., Sokolov, P. D.** Svarka s impulsnoy podachey svarochnoy provoloki kak chastnyiy sluchay impulsno-dugovoy svarki. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2006, 7, 6 – 8.
15. **Harris, I.** Transfer of Heat and Mass to the Base Metal in Gas Metal Arc Welding. *Welding, Brazing, and Soldering*, 2011, 6, 82-88.
16. **Dyurgerov, N. G., Sagirov, D. H.** Opredelenie svoystv dugi pri impulsnyih protsessah svarki. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2004, 4, 14-17.

Сведения об авторах (About authors)

Лебедев Владимир Александрович – док. техн. наук, профессор, главный конструктор ГП ОКБ ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, г. Киев, Украина; ORCID: 0000-0003-0391-6113; e-mail: vakpaton@ukr.net.

Vladimir Lebedev – doc. tech. sciences, professor, chief designer Experimental Design-Technological Office of the E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy, Kiev, Ukraine; ORCID: 0000-0003-0391-6113; e-mail: vakpaton@ukr.net.

Жук Геннадий Владимирович – инженер, директор ГП ОКБ ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, г. Киев, Украина; ORCID: 0000-0001-6615-8239; e-mail: uspt@ukr.net

Gennady Zhuk – Engineer, Director of the E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine; ORCID: 0000-0001-6615-8239; e-mail: uspt@ukr.net.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Лебедев, В. А. Анализ параметров механических управляемых колебаний в системах подачи электродной проволоки механизированного и автоматического оборудования для электродуговой сварки и наплавки / **В. А. Лебедев, Г. В. Жук** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 45 (1321). – С. 16-24. – doi:10.20998/2413-4295.2018.45.03.

Please cite this article as:

Lebedev, V., Zhuk, G. Analysis of parameters of technical controlled vibrations in electrode wire systems mechanized and automatic equipment for electric arc welding and surfacing. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, 45 (1321), 16-24, doi:10.20998/2413-4295.2018.45.03.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Лебедев, В. О. Аналіз параметрів механічних керованих коливань у системах подачі електродного дроту механізованого та автоматичного обладнання для електродугового зварювання і наплавлення / **В. О. Лебедев, Г. В. Жук** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 45 (1321). – С. 16-24. – doi:10.20998/2413-4295.2018.45.03.

АНОТАЦІЯ У статті наголошено на важливості вирішення завдання при зварюванні - наплавленні механізованим або автоматичним обладнанням, пов'язаної з з експлуатаційними властивостями зварного шва або наплавленого шару, зокрема міцності, характеристиками зносостійкості і ін. Проведено аналіз існуючих способів і методик, які впливають на структуру металу шва або наплавленого валика при зварці - наплавленні з використанням електродного дроту. Особливо відзначаються техніко - технологічні рішення, пов'язані з роботою основних систем зварювального і наплавкового обладнання в керованому режимі з імпульсними алгоритмами функціонування. В роботі розглянуто спосіб управління структуризацією наплавленого металу, наплавленням механізуються-ванними способами з використанням імпульсної подачі електродного дроту з регульованими параметрами її руху (частота, амплітуда, шпаруватість). Розроблена та запропонована для практичного застосування в технологічній практиці і конструкторській практиці методика визначення параметрів коливань, заснована на періодичному зміні тепловкладенням в метал ванни із загальним зниженням загальної їх величини. Основна посилка для вирішення завдання зниження тепловкладенням полягає в зменшенні різниці між температурою плавлення і перегріву. Зменшення різниці між температурами плавлення і перегріву за рахунок імпульсного руху електродного дроту з вибраними параметрами параметрами за розробленою методикою веде до обмеження зростання кри-сталітів і їх дезорієнтації. Важливим наслідком застосування імпульсних впливів в системі подачі є-ється дегазація зварювальної ванни, а також зниження рівня неметалічних включень.

Адекватність методики розрахунку параметрів коливань підтверджена отриманими при наплавленні результатами для порівняння з імпульсною і звичайною подачею електродного дроту. Висновок зроблений на підставі вивчення структур шва або наплавленого металу на мікрошліф з виявленням розмірів і орієнтації кристалітів. Дослідження впливу параметрів імпульсної подачі, з алгоритмом функціонування відповідним розглянутої методики, що дозволяє реалізувати запропонований спосіб наплавлення виконувалася із застосуванням нового пристрою імпульсної подачі, конструкція якого включає регульований комп'ютеризований вен-тільний електропривод спеціальної розробки, виконаної в Україні з безредукторним механізмом подачі. Сам спосіб зварювання і наплавлення в результаті підвищує міцність зварного з'єднання, зносостійкість наплавленого шару металу тим самим збільшує ресурс роботи металоконструкцій і робочих органів різних машин і механізмів. важливим є зниження деформацій, зокрема при зварюванні тонколистових виробів без додаткових пристосувань.

Ключові слова: механізована дугова зварка; наплавка; структуризація металу; механічні коливання; параметри; вибір; управління

Поступила (received) 08.12.2018